

La dinámica marina

En este trabajo se realiza una revisión general de los aspectos generales de la dinámica marina, especialmente centrado en playas y la parte más cercana a la costa de la plataforma. Es evidente que la dinámica de erosión, transporte y depósito de sedimentos, jugará un papel fundamental en la removilización de contaminantes. Formas de acumulación más profundas, jugarán un papel fundamental como reservorios de contaminantes. También es importante, especialmente en el caso de aplicar biorremediación, el efecto que producirá el desplazamiento ligado a las mareas de la interfase agua dulce-agua salada.

This paper deals with a general overview of marine dynamics, mostly focused on beaches and near shore continental platform environment. The role played by the erosion, transport and further sediment deposit in pollutant feedback processes seems to be crucial. Deeper accumulation forms will act as important pollutant reservoirs. In the case of bioremediation mechanisms application, the continuous migration of the tide-linked freshwater/saline water interface will be very important too.

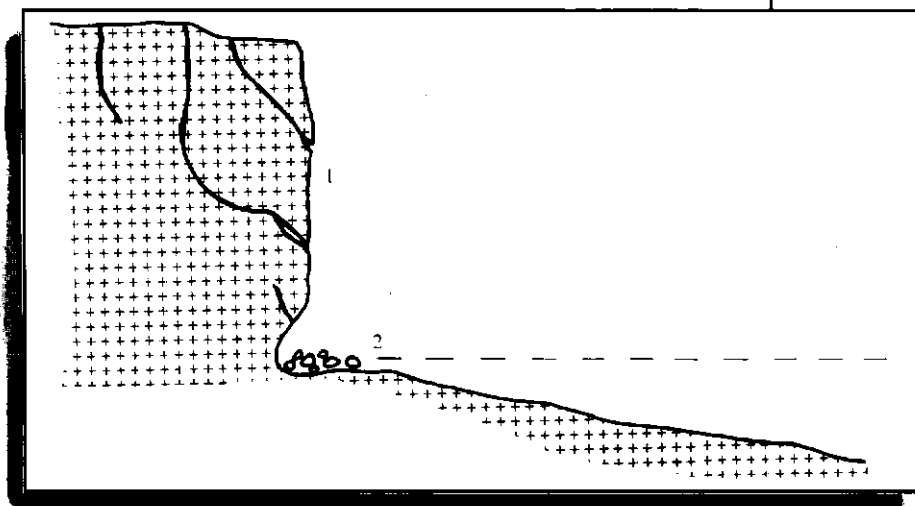
T. Torres
Dr. Ingeniero de Minas
Catedrático
J. E. Ortiz
Dr. Ingeniero de Minas
Profesor Asociado
Laboratorio de Estratigrafía
Biomolecular

E.T.S.I. de Minas de Madrid

En el entorno de informaciones referidas al desastre del *Prestige*, se pone de manifiesto, con cierta claridad, el perfecto desconocimiento del medio físico en el que se escenifica el desastre. Este medio, por su propia dinámica, merece algo más de consideración, siendo preciso contemplarlo en sus muchas facetas. Ellas reflejarán, para bien ó para mal, todas las actuaciones

posteriores como: reinicio de las actividades extractivas pesqueras, uso turístico de la zona, limpieza, remediación, información mediática y política. Pues bien, valgan estas consideraciones para aquellos que parecen necesitarlas, no para aquellos que las conocen sobradamente: mariñeros, marinos y todos los científicos, predominantemente ignorados, que trabajan en el estudio del medio marino.

Figura 1.
Esquema del desarrollo de un acantilado.
1-acantilado con zopamamiento basal;
2- plataforma de abrasión.



El medio marino

El dominio marino se puede dividir en dos ambientes de extensión desigual: el medio nerítico, hasta 200 m de profundidad, y el medio oceánico, la zona restante y arealmente mucho más importante.

El medio litoral se divide en varios subambientes:

- Supralitoral o supramareal (*backshore*), por encima de la zona de alcance de las mareas altas.
- Interlitoral o intermareal (*foreshore*), zona comprendida entre las mareas alta y baja.
- Sublitoral o infralitoral (*shoreface*) hasta la zona del donde rompe bruscamente la pendiente la plataforma costera. En esta zona se identifica una parte, denominada *nearshore*, que va desde la línea de costa a la zona de rotura.

El medio oceánico también se subdivide en varias zonas, de acuerdo a su batimetría y morfología (pendiente).

- Zona batial, que corresponde al talud
- Zona abisal, el fondo oceánico por debajo de 4.000 m.
- Zona hadal, las partes más profundas.

Digamos que, de una manera descriptiva, tendríamos que el conjunto del problema del Prestige abarca dos ambientes claramente diferenciados: el medio próximo y el medio lejano. En el primero se situarán los dos puntos del fondo oceánico, abisal, en el que están los dos pecios en los que se ha convertido el petrolero naufragado. En el medio lejano, la zona litoral, es la que alberga la biomasa principal y la zona de interés económico y social.

Ello no quiere decir que el medio próximo no esté, por su posición remota, contribuyendo a la contaminación del medio lejano por fugas en "fisuras". Algunas de estas fisuras, en televisión al comentar algunas de las pocas imágenes, se denominan bitas, que son, de acuerdo al "Seco" "una columna de acero afirmada sobre una base a cubierta, alrededor de la cual se sujetan los cabos de amarre". Parte del fuel podrá alcanzar, cuando se "solidifique" otras áreas, al ser transportado por corrientes geostroficas que transportan y depositan sedimentos en zonas muy profundas, dando lugar a unos depósitos que se denominan contouritas (Essen et al. 1966). Aunque en esta nota no nos ocuparemos más de ellas, ahí quedan.

Si volvemos nuevamente a la zona nerítica, figura 1, también podemos establecer otras divisiones que serán de interés a la hora de analizar como y porqué el fuel del

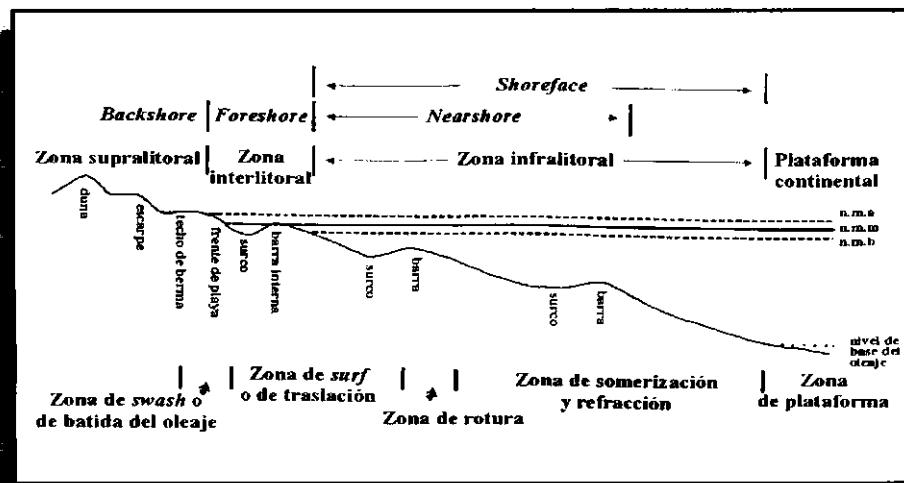


Figura 2.
Zonación de un perfil de playa (según Guillén 1992, tomado de Gracia et al 2000).

Prestige se deposita en una zona u otra.

- La zona intermareal o interlitoral (*foreshore*), ocupa la parte más elevada del perfil de la costa, de forma que solo está mojada entre mareas.
- La zona que está afectada por el oleaje normal (oleaje de buen tiempo), se denomina *upper shoreface* o zona infralitoral superior.
- La zona que está afectada por el oleaje de tormentas se llama zona infralitoral inferior o *lower shoreface*.
- Por debajo, generalmente inafectada está la zona de mar abierto: plataforma (*offshore*).

Es obvio que estas divisiones son variables, según zonas geográficas y regímenes climáticos; no obstante, se puede decir que el límite de profundidad del mar abierto varía entre poco más de 20 metros hasta 50-200 m.

La dinámica de las aguas marinas

El movimiento de las aguas marinas va a ser el gran elemento modelador de la morfología de las costas. Existen tres tipos fundamentales de movimiento de las aguas marinas (Nichols 2000):

- Oleaje
- Mareas
- Corrientes

El agente modelador más importante, al menos a simple vista, es el del oleaje, que puede definirse como el movimiento ondulatorio del agua, del mar en este caso, que generalmente será generado por la acción del viento. Sus características dependerán de la intensidad del viento, de su duración y del su recorrido sobre la superficie del mar. De aquí que el oleaje continúe durante un cierto tiempo, aunque el viento que lo originó ya hubiera cesado.

Durante la mayor parte del tiempo las olas "no se mueven", en otras palabras, no se trasladan, al ser un movimiento oscilatorio de las partículas del agua marina, que describen trayectorias circulares, de radio menor cuanto mayor es la profundidad a la que se encuentran, hasta que su movimiento cesa, por ello se denominan olas de oscilación. Por lo tanto, es el viento, como muy bien sabemos el que va haciendo derivar los materiales que flotan, los hidrocarburos entre otros, hasta acercarlos a la costa. Cuando las olas se van acercando a la costa, las partículas, que rotaban libremente según trayectorias circulares, en las partes más profundas de la zona afectada por el oleaje oscilatorio, comienzan a rozar con el fondo del mar y se retrasan respecto las que giran en órbitas más cercanas a la superficie. A partir de este

punto la ola comienza a "levantarse" aparece la cresta (zona de *surf* en la literatura anglosajona) y, finalmente, se desploma en la zona de rotura. Obviamente, se produce una gran liberación brusca de energía que es un agente erosivo de gran importancia.

Las olas no se comportan de una manera caprichosa, ya que su paso de movimiento ondulatorio a traslación viene definido por un parámetro: la profundidad efectiva. Este es equivalente a la mitad de la longitud de onda del oleaje: la mitad de la distancia que separa dos crestas o dos valles sucesivos de olas de oscilación. Por debajo de esta profundidad, el roce de las partículas con el fondo, provoca que empiecen a describir órbitas ligeramente elípticas, y afectarán al fondo. Esta afección no es mala en sí, ya que transporta oxígeno y nutrientes, pero no impedirá que los contaminantes de densidad similar a la del agua, el chapapote p.e., no se quede estático, rodando y formando masas alargadas que atraparán animales que viven asociados al fondo marino (bentónicos) muchos de los cuales son objeto de interés económico.

Cuando las olas se acercan a la costa, sufren un fenómeno que es realmente importante: la refracción del oleaje: la líneas del oleaje (crestas) tienden a colocarse paralelas a la línea de la costa. Esto explica que los cabos o promontorios son batidos por el oleaje por todos los lados y sometidos, por lo tanto, a una erosión mecánica muy importante. Por el contrario, los fondos de bahía se suelen irse rellenando por aportes de detriticos, que no son sino los aportes del oleaje casi paralelo a la línea de costa.

Las mareas, aunque no merecen especial descripción, se

pueden resumir en la sucesión, dos veces al día, de subidas y bajadas del nivel de mar. Fundamentalmente por la acción de la atracción solilunar, aunque se reconoce también la influencia del efecto Coriolis. Las mareas no solamente alteran la posición relativa del nivel de base del oleaje sino que también inundan con agua marina zonas llanas de la interfase continental-marino, marismas s.l., que suelen ser de alta productividad biológica y de gran fragilidad e interés medioambiental.

El oleaje es también responsable de dos tipos de corriente que afectan profundamente los depósitos costeros, en especial a las playas: las corrientes de deriva litoral:

- Dado que el oleaje incidente es asimétrico, ya que la refracción no suele ser total, hay un transporte hacia tierra.
- El oleaje, por sí mismo, provoca una elevación longitudinal del nivel del mar en la zona costera de playa y se crea una corriente de fondo que transporta material mar adentro.
- Transporte hacia mar abierto de sedimento por oscilaciones infragravitatorias debidas a la asimetría del oleaje incidente.

En cualquier caso el material no acumulado (erosionado) directamente en la zona de incidencia del oleaje va a seguir dos caminos:

- Una parte del material se moverá longitudinalmente a lo largo de la playa por las

corrientes de deriva debidas al oleaje.

- Otra parte del material irá a parar a la parte sumergida de la playa, donde se acumulará formando barras, cuya posición será variable a lo largo del tiempo, aunque en general tenderá a migrar hacia tierra.

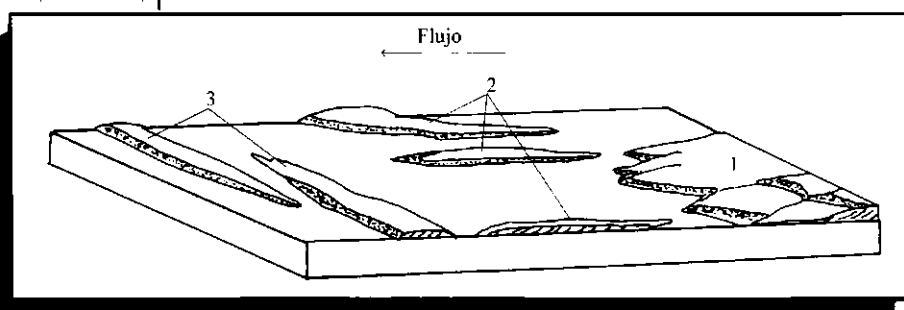
Las costas

Las costas son susceptibles de numerosas clasificaciones, según su contexto geológico, oceanográfico o geomorfológico (ver **Gracia** et al., 2000). Valga decir que la costa gallega, de acuerdo con la clasificación de **Johnson** (1919) sería una costa de hundimiento, en la que predomina la morfología de ría, denominación que coincide con la clasificación más reciente de **Kellett** (1995). De acuerdo con la clasificación de **Cotton** (1952) sería una costa de región estable, con formas derivadas tanto de emersión previa como de hundimiento reciente. De acuerdo con **Valentín** (1952) sería una costa en retroceso-retrogradante en la zona de acantilados. Posteriormente **Sephard** (1976) daría una clasificación en las que las costas gallegas se incluirían en el grupo denominado de "costas primarias".

De cualquier forma, las costas oceánicas de la Península Ibérica constituyen sistemas muy complejos en los que parece existir una sucesión de estadios evolutivos, generalmente bien reconocidos:

- Un levantamiento relativo de la costa, con la exhumación

Figura 3. Formas generadas por acumulación de sedimentos en la zona de plataforma (Modificado de Nichols 2000).
1-crestas arenosas (sand ridges);
2- cordones arenosos (sand ribbons);
3- barras arenosas (sand waves).



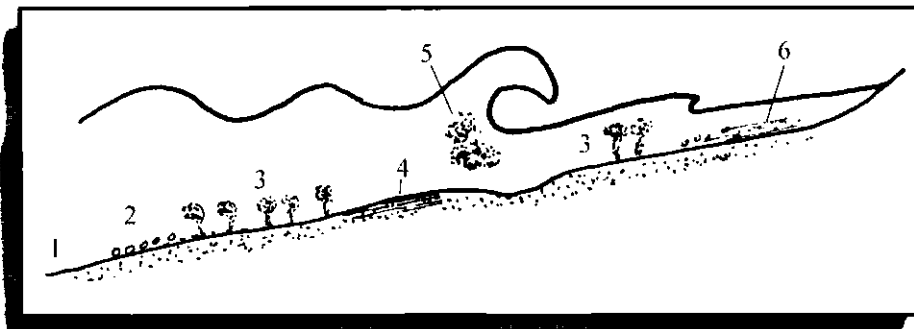


Figura 4. Fenómenos que se producen en la zona de banda del oleaje (realiza 2000).
1-no afectado por el oleaje; 2-trasporte por rodadura; 3-turbulencias y generación de ripples;
4-cizalla paralela al lecho marino y laminación paralela en su caso; 5-erosión del fondo por
cavitación, suspensión de nubes de arena, sedimentación gradada; 6-cizalla paralela al fondo
sobre material más grueso, en su caso laminación paralela.

ción de rasas costeras previamente cubiertas por el mar.

- Un hundimiento tardío debido a la transgresión del Flandriense (6.000 BP) que inundó valles fluviales preexistentes, propiciando la generación de las rías.

La costa gallega, además, tiene numerosas peculiaridades, fundamentalmente ligadas a su desarrollo irregular, de forma que hay zonas rocosas sometidas a fuerte erosión mecánica por el oleaje (acantilados), mientras que hay fondos de bahía, sea cual sea su escala, en la que se produce acumulación de materiales clásticos. Tampoco hay que olvidar el desarrollo de zonas de marisma y las dunas de transplaya.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que todos los ambientes descritos van a estar sometidos durante largo tiempo a una exposición variable, siempre importante, a la acción de los agentes contaminantes derivados del vertido del Prestige, que a continuación se pasará a describir.

Dunas de transplaya

Aunque los sistemas dunares no son parte dominante del sistema marino de la zona afecta por el vertido, no hay duda de su afección futura o presente.

El trasiego de personas y residuos durante las operaciones de recogida de chapapote indudablemente ha afectado a la geometría de los sistemas dunares, degradando la frágil cubierta biológica. También habrá aportado por accidente, fragmentos de chapapote caídos. En el futuro habrá que esperar un aporte importante de clastos de chapapote, una vez que se solidifique más profundamente y se haga frágil, siendo, gracias a su baja densidad, transportado por el viento, hasta quedar retenido en trampas de sedimento en las zonas dunares.

Marismas

Si se entiende como tal el conjunto de marismas bajas (*slikke*), inundables con cualquier marea y marismas altas, que solamente se inundan en las mareas vivas (*schorre*), se trata de medios muy sensibles a la afección medioambiental. Si fueron previamente protegidas, habrán quedado protegidas de la llegada de contaminantes, aunque no hay que ignorar la posibilidad de que, conforme se vayan desprendiendo de las películas sobre roca, puedan alcanzarlas.

Zonas arenosas emergidas

Las zonas arenosas emergidas forman parte de los ambientes de acumulación, transi-

ción y transporte de los materiales aportados por el oleaje, corrientes marinas y mareas. Existe una amplia serie de clasificaciones aunque aquí vamos a citar de forma rápida las clases definidas por **Zenkovitch (1967)**:

- Formas adosadas: playas, bermas y promontorios arenosos
- Formas libres: flechas
- Barreras
- Formas de conexión: playas barrera y tómbolos
- Formas desconectadas: playas barrera, islas.

Estas zonas habrán sufrido una enorme agresión por la llegada de chapapote y las labores de limpieza.

Acantilados y zonas rocosas

En zonas costeras rocosas aparecen dos formas dominantes: las plataformas de abrasión y los acantilados, ver figura 2.

Las plataformas de abrasión se generan en la base de los acantilados, tras su retroceso por zapamiento. Los acantilados generalmente están sometidos a procesos de retroceso, bien por la acción mecánica del oleaje, bien por la meteorización, muy intensa sobre materiales graníticos en los que el oleaje y la bioerosión desagregan las capas superficiales de la roca, sobre la que se asientan numerosas comunidades biológicas y, actualmente, el chapapote. La acción de raspado de la película de hidrocarburos también arrastrará la capa superficial de roca meteorizada en la que, como se ha indicado, se asientan numerosas comunidades animales y vegetales.

Formas subacuáticas

Aunque las formas subacuáticas se caracterizan por ser efímeras, no pueden ser dejadas de tener en cuenta, toda vez

que actúan como reservorio o sumidero de sedimentos, es decir, se producirán lo que en geomorfología se denomina "reagrupamientos y estabilizaciones" es decir aparecerán formas de "acreción-agradación" en el sentido propuesto por **Pedraza** (1996). En este caso consideraremos al chapapote como un tipo más de sedimento, aunque de origen antrópico.

Dado el carácter mixto de la costa gallega, donde coexisten condiciones meteorológicas en las que son frecuentes los episodios de tormenta y en la que, de acuerdo con la amplitud de las mareas, se dan condiciones mesomareales, se tendrá una superposición de corrientes debidas al oleaje y otras debidas a las mareas.

De forma general, las formas subacuáticas responden a dos entornos distintos: las que aparecen asociadas a la playa, es decir, las partes más someras del fondo marino y las más profundas, por debajo del nivel de base del oleaje.

En las zonas de fondo de playa habrá formas menores como ripples (rizaduras), megaripples (dunas) o fondos planos, según estados de energía creciente.

En zonas más profundas de la zona infralitoral, figura 3, aparecerán trenes de barras litorales (acumulación) y surcos (erosión), en una disposición que los autores anglosajones denominan "ridge and runnel", seguidos hacia zonas más profundas por cordones arenosos (*sand ribbons*) y barras arenosas (*sand waves*).

Unos apuntes sobre dinámica

Las formas de gran tamaño que se desarrollan por debajo del nivel de base del oleaje no serán estables a lo largo

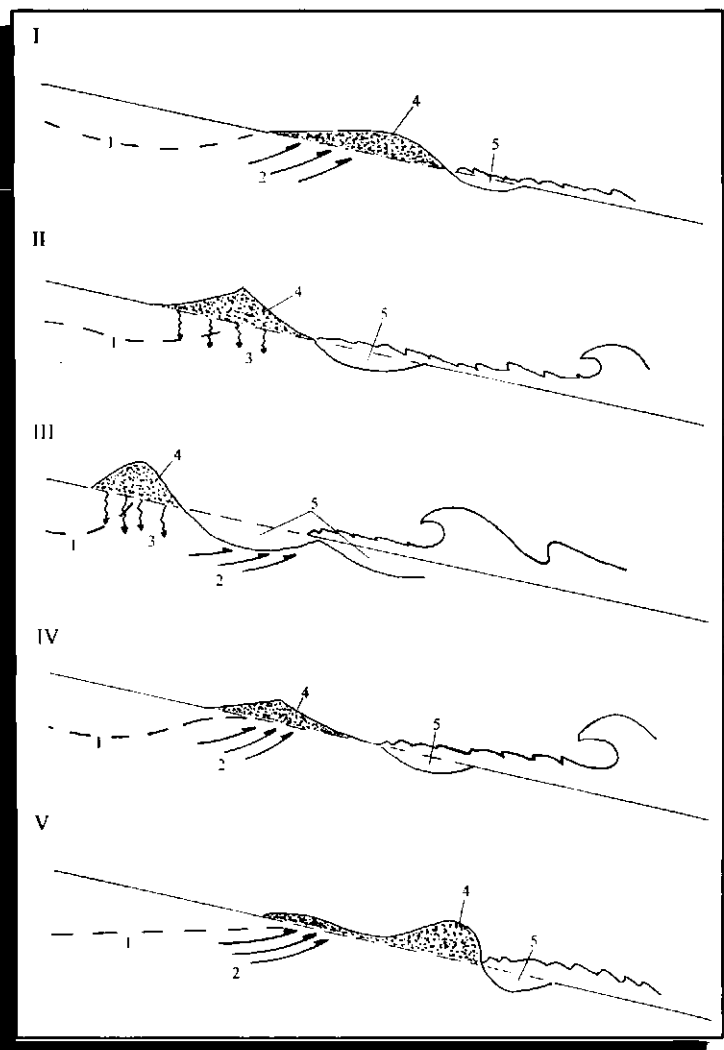
del tiempo. Su migración estará ligada a las corrientes geostróficas, corrientes de marea, en mares de gran amplitud de marea, y de fondo durante episodios de tormenta. Estos procesos, aunque menos perceptibles, resultan de enorme importancia ya que pueden actuar como reservorio de sedimentos y, obviamente, de contaminantes, como es el chapapote, que podrá irse liberando lentamente conforme las formas, metaestables en cualquier caso, vayan migrando lentamente según las corrientes de la zona, o incluso de la época del año.

Donde el carácter efímero de las formas se manifiesta de forma más palpable es en el área afectada por la batida del oleaje, figura 4. En esta zona se producirá una fuerte alteración de la morfología del fondo en la zona de rom-

pientes: se producirá una sobre-excavación. El material arrancado permanecerá suspendido corto tiempo y al caer podrá dar lugar a la aparición de sedimentación gradada (tempestitas). También aparecerán formas propias, si se trata de una tempestad (*hummocky cross bedding*). En el fondo se generarán turbulencias que darán lugar a la aparición de ondulaciones del lecho (*ripples*), de corta vida, y laminación paralela de alta energía, por esfuerzos de cizalla paralelos al perfil del fondo.

Cuando se conjugan las acciones de subida y bajada de marea y el oleaje, se observa que existe un importante cambio morfológico diurno, que conlleva la excavación de surcos asociados a la rompiente, el cual, con las subidas y bajadas de la marea, se irá desplazando a lo largo del perfil trans-

Figura 5. Relaciones entre nivel de base y ciclos mareales en la zona infralitoral. (Duncan 1964). I- marea baja; II- punto medio del flujo de marea; III- punto culminante del flujo de marea; IV- punto medio del refluo de marea; V- marea baja. 1- nivel de base; 2- zona de efluente; 3- zona de infiltración; 4- acumulación; 5- excavación.



versal de la playa. Algo similar se producirá con las crestas de las barras efímeras generadas por la acumulación de sedimentos en la zona interlitoral.

Si ahora se contempla el sistema playa desde un punto de vista de biorremediación, habrá que tener en cuenta también la compleja interrelación que se establece con el agua aportada por el sistema marea-oleaje y el agua subterránea propia de un medio extremadamente poroso, como es el de una playa arenosa, figura 5. El balance final de estos procesos se puede resumir en que el sistema playa pueda evolucionar hacia una pérdida de sedimento, algo que ocurre frecuentemente cuando se interrumpen las corrientes litorales de deriva mediante espigones incontrolados. También puede ocurrir que la playa tenga una ganancia de sedimentos, que puede estar condicionada por su posición topográfica-fondo de bahía, o por la acción de espigones de retención de sedimentos. Como ejemplo de pérdidas y ganancias de sedimentos en una playa, se incluye en la figura 6, la evolución de una playa oceánica como la de Las Canteras en Gran Canaria (Alonso et. al. 2000) donde se describe la tendencia general de la playa, aunque es especialmente notable el valor del rango de variación de las tasas de erosión/acumulación, que alcanzan volúmenes de más de 70.000 m³.

Pero no solamente es un sistema dinámico en orden al transporte de sedimentos, sino que también lo es desde un punto de vista hidrogeológico. En la figura 6 se observa detalladamente el sistema, se puede apreciar que hay periodos en los que el agua subterránea tiene carácter efluente al ascender; en otros momentos predomina un ré-

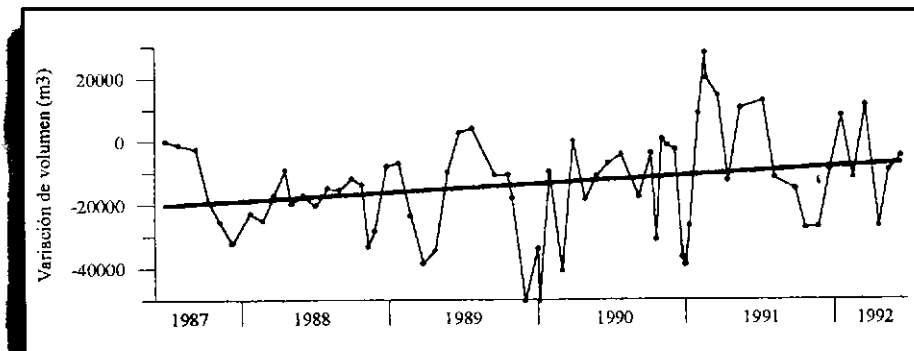


Figura 6.
Variaciones
plurianuales de
volumen de
sedimentos en
la playa de Las
Canteras,
Gran Canaria
(tomado de
Alonso et al.
2000).

gimen influente ya que el agua marina superficial se infiltra, modificando el contorno del nivel de base. Este aspecto es muy importante ya que asegura un aporte bi-diurnal de oxígeno nutrientes (aportados en su caso), aunque en zonas topográficas algo distintas.

Conclusiones

Los sistemas marinos y costeros muestran una dinámica cambiante difícil, posiblemente imposible de predecir. Cualquier intento de limpieza, en su caso biorremediación, deberá realizarse tomando en cuenta su idiosincrasia específica. Además, no se ha de olvidar que el uso de reactivos/abonos podrá afectar negativamente a la fauna intersticial, que deberá ser controlada.

Referencias

- Alonso, I.; Vilas, F. y Alcantará-Carrió, J. (2000) Importancia de la escala temporal en estudios de dinámica litoral (2000). de Andrés, J.R. y Gracia F.J. Gracia eds. Geomorfología litoral, procesos activos. Instituto Geológico Tecnológico GeoMinero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología. 31-43.
- Cotton, C.A. (1952) Criteria for the classification of coasts, 17th Int. Geogr. Congr. Abs. Paper 15.
- Duncan, J.R. (1964) The effects of water table and tidal cycles on swash-backwash sediment distribution and beach profile development. Marine Geol, 2: 186-197.
- Gracia, F.J.; Benavente, J. y Anfuso, G. (2000). Clasificación de costas y ambientes litorales en (de Andrés, J.R. y Gracia, F.J. Gracia eds). Geomorfología litoral, procesos activos. Instituto Geológico Tecnológico GeoMinero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología. 13-30.
- Heezen, B.Z.; Hollister, D.C. y Ruddiman, W.F. (1966) Shaping if the continental rise by deep geostrophic currents. Science 152, 502-508.
- Johnson, D.W. (1919) Shore processes and shoreline development. John Wiley & sons N.Y. 584pp.
- Kellettat, D.H. (1995) Atlas of coastal geomorphology and zonality. J. Coastal Research Spec. Iss. 13. Fort Lauderdale, Florida. 286pp.
- Nichols, G. (1999). Sedimentology and Stratigraphy. Blackwell Science Ltd 355 pp.
- McLane, M. (1995). Sedimentology Oxford University Press 423 pp.
- Seco, M.; Andrés, O. y Ramos, G. (1999) Diccionario del español actual Aguilar 2V.
- Sephard, F.P. (1976) Coastal classification and changing coastlines. Geosciences and Man, 14: 53-64.
- Valentin, H. (1952) Die küsten der Erde Petermannns Geographische Mitteilungen, 246: 1-1118.
- Zenkovichhh, Vp.P (1967) Processes of Coastal Development. Oliver and Boyd 378 pp.